

Kaksoisrakokoe fotoneille

Fotoni – fysiikan avoin opetuslaboratorio

Tämä työ tehdään pienryhmässä ja tavoitteena on kirjoittaa selostus kaksoisrakokokeesta fotoneille. Selostus tehdään tieteellisen artikkelin muotoon. Ennakkotehtävänä on kerätä taustatietoa kokeen ymmärtämistä varten ja valmistautua laboratoriovierailuun. Laboratoriossa tutustutaan koelaitteistoon ja mittauksiin ja sinulla on mahdollisuus kysyä epäselvistä tai kiinnostavista kohdista ohjaajalta. Ota kuvia ja tee muistiinpanoja. Laboratoriovierailun jälkeen on vuoro analysoida valmista mittaustietoa ja kirjoittaa selostus valmiiksi.

Sovi opettajasi kanssa selostuksen sopivasta pituudesta. Pituuteen ei lasketa lähdeluetteloa eikä liitteitä. Selostus kirjoitetaan omin sanoin. Kaikki selostuksessa käytetty lähdemateriaali on ilmoitettava selostuksen lopussa lähdeluettelossa. Merkitse hyödylliset lähteet muistiin siis jo ennakkotehtävää tehdessäsi.

ENNEN LABORATORIOON SAAPUMISTA

Tutustu Youngin kaksoisrakokokeeseen vuodelta 1801. Millainen oli koejärjestely? Mitä kokeessa havaittiin? Mitä tuloksista pääteltiin ja miksi koe oli merkittävä klassisessa fysiikassa?

Mitä tiedät valon fotonimallista etukäteen? Mitkä ilmiöt tai kokeet olivat tärkeitä fotonimallin syntymiselle?

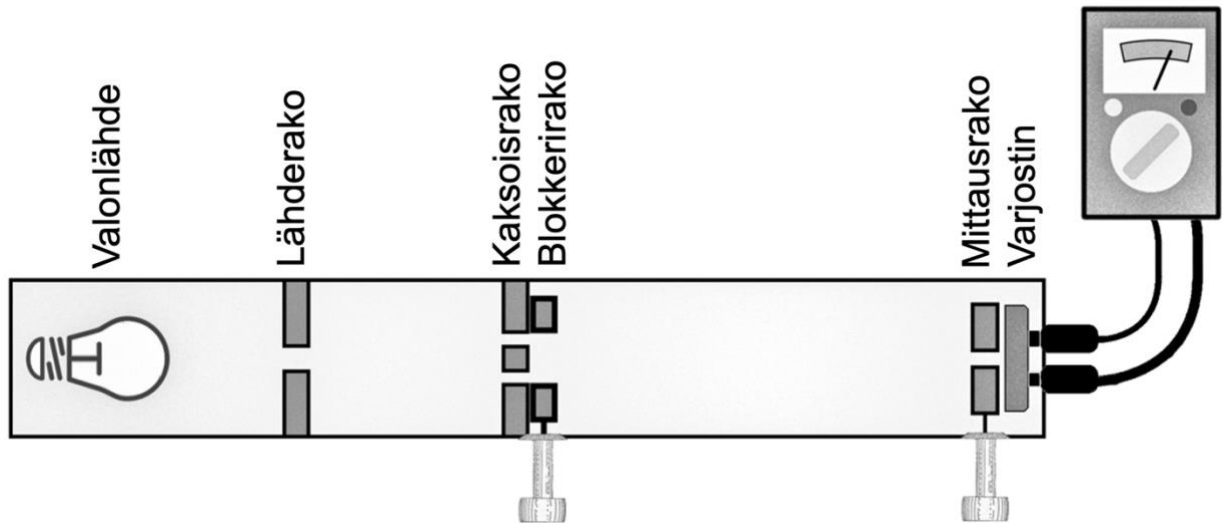
Katso video: https://www.youtube.com/watch?v=7gG_O71ViCo (Kvanttifysiikan perusteita: Kaksoisrakokoe yhdellä fotonilla).

Lue työohje läpi ja valmistaudu kysymään epäselvistä kohdista.

LABORATORIOVIERAILULLA

Tavoitteenamme on tutkia valon käyttäytymistä ja pohtia, millainen malli kuvaisi sitä parhaiten. Tutustumme koelaitteistoon (katso kuva 1) ja mittauksiin ohjaajan johdolla.

Voit ottaa kuvia esimerkiksi koelaitteistosta ja kirjoittaa muistiinpanoja selostusta varten.



Kuva 1. Kaksoisrakokokeen koelaitteisto.

Millaisia tuloksia klassinen aaltomalli ennustaa kaksoisrakokokeessa?

Millaisia tuloksia klassinen hiukkasmalli ennustaa kaksoisrakokokeessa?

Mitkä ovat koelaitteiston osat?

Mitä valolle tapahtuu, kun se kulkee lähderakon läpi?

Mitä valolle tapahtuu, kun se kulkee kaksoisraon läpi?

Mitä blokkeriraolla säädetään?

Mitä mittausraolla säädetään?

Varjostimena kokeessa käytetään fotodiodia (klassisessa kaksoisrakokokeessa) ja valomonistinputkea (kaksoisrakokokeessa yksittäisille fotoneille). Mihin ilmiöön valon kirkkauden mittaaminen perustuu?

Mitä tapahtuu, kun mittausrakoa siirretään?

Mitä mittareita laitteistoon on kiinnitetty? Mitä ne kertovat?

Klassinen kaksoisrakokoe

Kun laitteistolla tehdään klassinen kaksoisrakokoe, mittausdataksi saadaan jännitteen (V) arvoja paikan (mm) funktiona. Mitä jännitteen arvot kertovat valon kirkkaudesta tietyssä paikassa?

Kaksoisrakokoe yksittäisillä fotoneilla

Valonlähteeksi vaihdetaan himmeä vihreä lamppu. Sen tuottamasta valosta voidaan määrittää, että on äärimmäisen harvinaista, että kaksoisraossa kulkee useampi kuin yksi foton kerrallaan. Toisin sanoen voimme nyt toistaa edellisen kokeen käyttäen valona yksittäisiä fotoneja.

Mittarinamme on valomonistinputki, joka on hyvin herkkä valomittari. Mittariin on kytketty pulssilaskuri. Pulssilaskuri naksahuttaa joka kerran, kun se mittaa yksittäisen fotonin. Voimme nyt kuunnella fotonihavaintojen taajuutta. Kun painamme MANUAL-vipua alaspäin, laskuri laskee yksittäisiä fotoneja 10 sekunnin ajan.

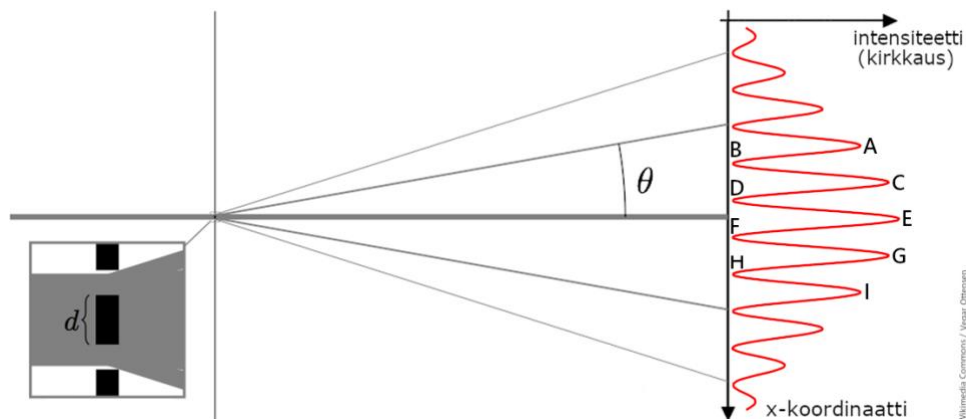
Etsitään kohta, jossa fotoneja havaitaan suhteellisen paljon. Montako osumaa saadaan 10 sekunnissa? Toistetaan tätä muutaman kerran. Kirjaa arvot ylös. Montako prosenttia eroa on suurimman ja pienimmän tuloksen välillä? Saamme näin nopean arvion tilastollisesta virhemarginaalista.

Kun laitteistolla tehdään kaksoisrakokoe yksittäisillä fotoneilla, mittausdataksi saadaan fotoniosumien lukumäärä 10 sekunnissa paikan funktiona. Mitä lukumäärät kertovat valon kirkkaudesta tietyssä paikassa?

DATA-ANALYYSI

Saat ohjaajalta valmiiksi mitatun datan.

Esitä mittausdata koordinaatistossa niin, että vaaka-akselilla on paikka (mm) ja pystyakselilla valon kirkkautta kuvaava suure. Hahmottele kuvaajan muoto koordinaatistoon. Määritä, missä kohdin on kuvaan 2 merkityt intensiteettimaksimit ja -minimit (A–I).



Kuva 2. Koelaitteiston geometria.

SELOSTUKSEN KIRJOITTAMINEN

Selostuksen rakenne mukaillee fysiikan tieteellistä artikkelia. Kirjoita selkeästi kokonaisin lausein ja pyri tekemään selostuksesta johdonmukainen kokonaisuus. Seuraavassa käydään läpi tarvittavat osiot (joiden nimiä voit käyttää suoraan väliotsikkoina) ja niiden sisältö.

Selostuksen otsikko: Kaksoisrakokoe fotoneille

Johdanto ja teoria

Mitä tutkitaan ja miksi, mitä aiheesta tiedettiin aikaisemmin? Hyödynnä tähän ainakin ennakkotehtävän sisältö. Kerro klassisesta kaksoisrakokokeesta sekä klassisista aalto- ja hiukkasmalleista ja niiden ennusteista kaksoisrakokokeesta. Milloin kaksoisrakokokeita alettiin tehdä yksittäisille fotoneille ja mihin fysiikan teorioiden kehitykseen kokeet liittyvät? Mihin tutkimuskysymykseen kokeessa haetaan vastausta?

Koejärjestely

Esittele koelaitteisto ja käytä mieluummin kuvia tai kaavioita apunasi. Miten koe suoritettiin? Mitä mitattiin, mitä pidettiin vakiona, mitä varioitiin?

Tulokset

Miten data analysoitiin? Esitä numeeriset tulokset graafisesti, jos se on mahdollista. Jos osa tuloksista on laadullisia, esittele ne sanallisesti. Mikä on kokeen arvioitu tilastollinen virhemarginaali?

Johtopäätökset

Miten tuloksia voi tulkita? Saatiinko kokeessa vastaus tutkimuskysymykseen? Miten tulokset suhtautuvat teoreettisiin ennusteisiin? Ovatko tulokset luotettavia ja mitä mahdollisia virhelähteitä kokeessa oli? Onko tällä kokeella jotain kiinnostavia sovelluksia tai merkityksiä? Mitä jatkotutkimuksia voisi tehdä?

Lähteet

Lähteet on ilmoitettava niin, että työn tarkastaja löytää lähteet tarvittaessa. Jos käytät esimerkiksi tämän työohjeen kuvia tai ennakkotehtävän videon sisältöä, voit kirjoittaa viitteet esimerkiksi:

Fotoni – fysiikan avoin opetuslaboratorio (2023). Työohje, Kaksoisrakokoe fotoneille.

F2k-laboratorio (2020). Kvanttifysiikan perusteita: Kaksoisrakokoe yhdellä fotonilla | F2k. https://www.youtube.com/watch?v=7gG_O71ViCo

Liitteet

Voit laittaa tarvittaessa liitteisiin esimerkiksi pitkät matemaattiset välivaiheet, mittausdatan tai muuta työn kannalta olennaista sisältöä, joka muualla selostuksessa vähentäisi valmiin työn selkeyttä. Viittaa selostuksessa liitteisiin, esimerkiksi: "Mittausdata (katso liite A) analysoitiin..."

LIITTEET: LISÄPOHDINTAA KIINNOSTUNEILLE

Näissä liitteissä on lisätietoja ja pohdintaa kiinnostuneille. Sisältöjä saa mutta ei ole välttämätöntä hyödyntää selostuksen kirjoittamisessa.

Liite A. Kaksoisrakokokeen matematiikkaa

Kaksoisrakokuvion maksimien sijainteja kuvaa yhtälö

$$n \lambda = d \sin \theta_n,$$

missä n = monesko maksimi, λ = aallonpituus, d = kaksoisraon rakojen välinen etäisyys 0,3556 mm, ja

θ_n = maksimia vastaava kulma (katso kuva 2). Maksimit siis syntyvät kohtiin, joissa interferoivat aallot ovat samassa vaiheessa. Käytännössä yhtälö sanoo:

Keskellä kuviota on "nollas" maksimi. Ensimmäiset sivumaksimit sijaitsevat etäisyydellä, johon pidemmän matkan kulkeneella aallolla ylimääräistä matkaa on juuri yhden aallonpituuden verran. Näin saadaan kulma, jossa kyseinen maksimi on – siis minkä verran se on keskimaksimista sivussa.

Yhtälön oikea puoli voidaan määrittää, kun aiemmin on määritetty maksimien välinen etäisyys (ks. mittausdatasta määrittämäsi maksimit ja minimi A-I). Lisäksi tiedetään matka kaksoisraosta mittariin $L = 49$ cm. Näiden avulla voidaan määrittää kutakin maksimia vastaava kulma θ_n .

Näiden tekijöiden avulla voitaisiin määrittää valon aallonpituus, joka on n. 700 nm. Tämä vastaa punaista valoa.

Liite B. Mittalaitteisto

Valomonistusputki (photomultiplier tube) on käytännössä metallilevy, josta valosähköisen ilmiön myötä irtoaa elektroneja. (Vain 5–6 % fotoneista irrottaa levystä elektronin, mutta tämä on huomioitu laitteiston säädöissä). Fotonin irrottama elektroni löytää itsensä kiihdyttävästä sähkökentästä, joka sinkoaa elektronin suurella energialla toiseen levyyn. Elektronin törmäys irrottaa tästä levystä keskimäärin 4 elektronia, jotka sinkoavat taas seuraavaa levyä kohti. Yhdeksän "kerroksen" jälkeen yhden fotonin mitätön energia on "monistettu" ($4^9 = 262144$ -kertaiseksi). Tämä sähköinen pulssi voidaan havaita.

Valomonistusputken irrotustyö (muista valosähköinen ilmiö!) on n. 1,8 eV. Tässä käytetään vihreitä fotoneja (550 nm), joiden energia on n. 2,3 eV. Siis elektronin energia irrotessa on vain 0,5 eV. Fotoelektroni voi kulkea esim. 100 V kiihdytysjännitteen läpi, eli nyt sen energia olisi 100,5 eV, mikä riittää hyvin irrottamaan seuraavasta levystä elektroneja. Lopulta irronneita elektroneja on kylliksi ja on saatu aikaan n. 20 mikroampeerin virta (ja 50 ohmin vastuksen yli mitataan millivoltin jännite). Signaalia vahvistetaan vielä erikseen ennen kuin se ohjataan pulssilaskuriin, joka laskee jännitepulsseja – jotka vastaavat fotoneita.

Valosta vielä: vain osa valosta pääsee edes lähderaon läpi. Todennäköisyys sille, että tiettyinä hetkenä laitteen sisällä kulkevista fotoneista yksikään ei pääse valokanavan loppuun asti on 99,9997 %. On vielä

paljon harvinaisempaa, että laitteen sisällä kulkisi samaan aikaan kaksi fotonia, jotka olisivat pääsemässä perille asti. Käytännössä mittaamamme fotonit ovat siis saapuneet valokäytävän loppuun yksinään.

Liite C. Kvanttimekaniikan alkeita

Kvanttimekaniikka on fysiikan teoria, joka sai alkunsa 1800–1900-lukujen vaihteessa. Tällöin huomattiin esimerkiksi mustan kappaleen säteilyn, valosähköisen ilmiön ja Comptonin sironnan kautta, ettei klassinen fysiikka selittänyt kattavasti hyvin pienen kokoluokan ilmiöitä. Erilaisia mikroskooppisia aineen ja sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutusilmiöitä tutkittiin sekä kokeellisesti että teoreettisesti usean tutkimusryhmän voimin eri maissa. Esimerkiksi uusi malli sähkömagneettisen säteilyn energian kvanttumisesta oli kiistanalainen vuosia ennen kuin se hyväksyttiin. Tutkijat selvittivät myös atomin sisäistä rakennetta ja miten hiukkasia kuten elektronia kannattaa mallintaa. Kvanttimekaniikasta oli alussa keskenään kilpailevia muotoiluja, joista käyttöön valikoitui aaltofunktioesitystapa.

Kvanttimekaniikka kuvaa mikroskooppisia hiukkasia (kuten fotoneja ja elektroneja) aaltofunktioilla $\varphi(x)$, jotka ovat abstrakteja todennäköisyysaaltoja. Kun klassisessa fysiikassa hiukkaselle voidaan määrittää tarkka paikka, kvanttimekaniikassa taas aaltofunktion avulla voidaan määrittää todennäköisyysjakauma hiukkasen esiintymiselle. Todennäköisyysjakauma saadaan aaltofunktion itseisarvon neliönä $|\varphi(x)|^2$. Aaltofunktio malli selittää sitä, miten kaksoisrakokokeessa myös yksittäiset fotonit käyttäytyvät aaltomaisesti, kulkevat läpi kaksoisraon molemmista raoista ja synnyttävät osaltaan interferenssikuvioita varjostimelle. Aaltofunktiosta määritettävä todennäköisyysjakauma vastaa klassisessakin kaksoisrakokokeessa havaittavan interferenssikuvion intensiteettijakaumaa (katso kuvan 2 kuvaaja). Ennen kuin mittaamme fotonin osumakohdan varjostimella, fotoni etenee laitteistossa aaltofunktiona kuvaamana todennäköisyysaaltona ja sen tarkka paikka on epämääräinen. Mittauksessa fotoni ”lokalisoituu” tiettyyn kohtaan varjostinta ollessaan vuorovaikutuksessa varjostinmateriaalin pinnan elektronin kanssa. Tällöin sen olinpaikka määrittyy ja puhutaan aaltofunktion ”romahtamisesta”: tällöin todennäköisyys fotonin olinpaikalle on 100 % osumakohdassa ja 0 % kaikissa muissa kohdissa.

Kvanttimekaniikka ja havainnot kaksoisrakokokeesta yksittäisille fotoneille haastavat myös klassisen fysiikan käsitystä determinismistä: Klassisessa fysiikassa tietämällä tarpeeksi kattavasti lähtötilanteen voimme määrittää lopputuloksen (esimerkiksi mihin kohtaan tikkataulua heitetty tikka osuu). Kaksoisrakokokeessa taas yksittäisten fotonien osumakohdat varjostimella ovat aidosti satunnaisia. Samaan aikaan kokonainen, yksittäisistä satunnaisista osumakohdista muodostuva interferenssikuvio taas on aaltofunktion määräämän todennäköisyysjakauman muotoinen.

Kvanttimekaniikkaan sisältyy aaltofunktion ja todennäköisyystulkinnan lisäksi muitakin keskeisiä teoreettisia työkaluja, joiden avulla voidaan tehdä toimivia ennusteita ilmiöistä ja joiden käytöstä tutkijat ovat yksimielisiä. Sen sijaan kvanttimekaniikasta on edelleen kilpailevia tulkintoja, joihin vaikuttavat tutkijoiden omat tieteenfilosofiset näkemykset ja mieltymykset. Yllä esitetty tulkinta aaltofunktion romahtamisesta ja epädeterministisyydestä nojaavat niin sanottuun kööpenhaminalaiseen tulkintaan, joka on kvanttimekaniikan tulkinnoista vanhimpia ja edelleen käytetty.

Kvanttimekaniikan ja kvanttiolioiden tutkimuksesta on myönnetty useita Nobelin fysiikan palkintoja 1900-luvun alusta alkaen. Aihepiiri kytkeytyy vahvasti myös nykytutkimukseen – esimerkiksi vuoden 2022 Nobelin fysiikan palkinto myönnettiin fotonien ja niihin liittyvän kvantti-informatiikan tutkimuksesta.